

# **Ömlesztett kvarc szubmikrométeres megmunkálása lézeres hátoldali folyadékos maratással**

Ph.D. értekezés tézisei

**Vass Csaba**

Témavezető:  
**Dr. Hopp Béla**  
tudományos tanácsadó

Fizika Doktori Iskola  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

SZTE TTIK

Szeged  
2010

## Bevezetés, tudományos előzmények

Napjainkban számos területen alkalmaznak az ultraibolya (UV) tartományban is átlátszó, optikailag kiváló minőségű, kémiaiilag stabil, semleges és ellenálló anyagokat (kvarc - amorf ill. kristályos -, zafír,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ). A hagyományos felhasználási területek mellett (nagy teljesítményű lézer optikák, UV optikák) néhány új területen is alkalmaznak ilyen anyagokat. Alapanyagai lehetnek például a mikrofluidikában alkalmazott eszközöknek és mikrooptikai elemeknek is. Az alkalmazásokhoz fontos megtalálni azt a megmunkálási módot, amely az adott feladathoz megfelelő felbontást (mikro-, szubmikrométeres) és minőséget (megfelelően kicsi felületi érdesség) szolgáltat, emellett a termelékenysége az adott igények kielégítéséhez elegendően nagy.

Az UV-ben átlátszó anyagok finommegmunkálására léteznek hagyományos módszerek, mint például a porfúvás és a hidrogénfluoridos maratás, melyek litográfiás eljárásokkal kombinálva, több lépésben, nagy termelékenységgel képesek előállítani  $\approx 10\text{ }\mu\text{m}$  laterális feloldású, nem túlságosan sima mintázatokat. A szakirodalomban száraz maratásos technikáknak nevezett ion- és plazma maratásos eljárások a megfelelő litográfiás módszerekkel kombinálva alkalmasak az átlátszó anyagok nagy felbontású mikro- és akár szubmikrométeres megmunkálására (az ultraibolya fény diffrakciós limitjénél is jobb lehet a feloldásuk, akár  $\sim 50\text{ nm}$ ). Hátrányuk, hogy ezek az eljárások általában időigényesek, bonyolult eszközöket igényelnek, drágák, termelékenységük alacsony.

Az átlátszó anyagok megmunkálásának az előbb említett eljárásokkal szemben jó alternatívái a nagy pontosságot, jó feloldást, bizonyos esetekben megfelelő megmunkálási sebességet is biztosító lézeres eljárások: létezik közvetlen és közvetett lézeres megmunkálási mód aszerint, hogy a lézernyaláb önmagában, közvetlenül távolítja el a céltárgy anyagának kicsiny részét, vagy közvetve, valamilyen segédanyagot használva. A közvetlen lézeres megmunkálás egyrészt megvalósítható olyan lézerrel, melynek hullámhosszán a megmunkálandó anyagoknak már jelentős a fényelnyelése, így a lézeres anyageltávolítás alapjelensége, az abláció játszódik le, pl. fluor-lézer ( $\lambda=157\text{ nm}$ ), széndioxid lézer ( $\lambda=10,6\text{ }\mu\text{m}$ ) vagy lágy-röntgen lézer ( $\lambda\sim 10\text{ nm}$ ) használatakor. Másrészt, ha elegendően nagy teljesítménysűrűségű nyalábot használunk, akkor a kétfotonos fényelnyelés valószínűsége megnő, így az impulzus számottevő részét képes elnyelni a céltárgy, ami miatt az egy összetett folyamat eredményeképpen megmunkálható. Az előbb említett lézerek, lézerrendszerek (pl.  $\text{F}_2$ , femtoszekundumos vagy lágy-röntgen lézer) igen drágák, bonyolultak, nehezen kezelhetők, ezért ezek a módszerek ipari környezetben szinte alig

használhatóak. Az UV-áteresztő anyagok felületének közvetlen megmunkálása excimer lézerekkel is megvalósítható, de az így megmunkált felület minősége viszonylag rossz, az eljárás termelékenysége pedig kicsi.

Mindezek miatt a figyelem a közvetett lézeres eljárások felé fordult, hiszen az ezekhez alkalmazott fényforrások (excimer lézerek, ill. a frekvencianégyszerezett Nd:YAG lézer) már ipari körülmények között is bizonyítottak. A közvetett eljárásokban a megmunkálandó anyagnak az érkező lézerimpulzussal ellentétes oldalát (hátsó oldalát) valamilyen fényelnyelő anyaggal hozzák érintkezésbe (mely lehet folyadék, vékony szénhidrogén- ill. fémréteg), ami lehetővé teszi a hatékony megmunkálást, vagy a céltárgy hátsó oldalához közel helyezett fényelnyelő anyagból lézerrel generált plazma segítségével végzik az anyageltávolítást. Az indirekt módszerek közös előnye a viszonylag kis megmunkálási lézer-energiásűrűség, és az aránylag jó minőségű mart felszín.

A közvetett eljárások közül a legjelentősebb, a legtöbb lehetőséggel és előnnyel kecsegtető, rugalmas technika az értekezésem témáját képező lézeres hátoldali folyadékos maratás, a LIBWE (Laser-Induced Backside Wet Etching). A kb. 10 éve felfedezett eljárás során a megmunkálandó átlátszó anyag hátsó, megmunkálandó felületét egy, a lézer fényét erősen elnyelő folyadékkal hozzák érintkezésbe. A megfelelő paraméterekkel rendelkező, a céltárgyon keresztül érkező lézerfény a folyadék határfelülethez közeli részében elnyelődik, az átlátszó anyag egy vékony rétege pedig egy összetett folyamat eredményeképpen eltávozik a felületről. Az eljárás előnyei: egy lépésben megvalósítható megmunkálás (maszkolás nélkül), jól kontrollálható az eltávolított anyagvastagság, sima mart felszín és éles mart élek, nagy laterális feloldás, és a viszonylag alacsony megmunkálási küszöbenergiásűrűség.

## **Célkitűzések, alkalmazott módszerek, a kutatás menete**

A lézeres hátoldali folyadékos maratással foglalkozó cikkek áttanulmányozása után kiderült, hogy számos, a technikával kapcsolatos fontos kérdés még megválaszolatlan. A nyitott kérdések egy része alapkutatás jellegű, és magára a folyamatra vonatkozik, míg másik része a technika alkalmazhatóságát érinti. Ennek megfelelően a disszertáció célkitűzéseit a kutatásaim kezdetén a következő pontokban foglaltam össze.

1. Tanulmányozni kívántam a LIBWE folyamatot, hogy koherens elmélettel magyarázzam meg az anyageltávolítás mechanizmusát. Ehhez új, eddig ilyen elrendezésben nem használt lézert (ArF) és oldatot (naftalin/metil-metakrilát) kívántam alkalmazni (vizsgálataimban a céltárgy minden esetben ömlesztett kvarc

volt). Meg kívántam magyarázni azt, hogy bizonyos esetekben miért illeszthető két eltérő meredekségű egyenessel az energiasűrűség - maratási sebesség grafikon.

2. Céлом volt, hogy ne csak kísérleteken alapuló közvetett vagy közvetlen eredmények alapján írjam le az anyageltávolítást, hanem egy működőképes numerikus modellt is alkossak.
3. A szakirodalom nem ad választ arra a kérdésre, hogy vajon mekkora a LIBWE technikával elérhető legjobb laterális feloldás. Ezért célul tűztem ki, hogy megvizsgálom a technika legjobb feloldását interferometrikus úton előállított rácsstruktúra céltárgyba történő belemarása esetén. Tisztázni kívántam, hogy milyen tényezők befolyásolják az előállított rács legkisebb periódusát a nyilvánvaló optikai korlátokon túl.

Első vizsgálataimban a LIBWE eljárással megmunkált ömlesztett kvarc felületet tanulmányoztam atomi erő mikroszkóp és profilométer segítségével. Ezt követően az első eredményeim alapján az anyageltávolítási mechanizmusra egy hőtani folyamatokon alapuló modellt alkottam. Ezt követően a megmunkálás kísérő jelenségének (buborékképződés) vizsgálata és a modellszámítás kiterjesztése alapján valószínűsítettem, hogy a bizonyos esetekben jól működő első modellben nem vettem figyelembe minden, a folyamat szempontjából lényeges jelenséget. Ezért elvégeztem a megmunkált felszín részletes analízisét röntgen-fotoelektron spektroszkópiával ill. spektroszkópiai ellipszometriával. Ez utóbbi mérési eredményekkel kiegészítettem és továbbfejlesztettem a korábbi modellt, melynek eredményei a legtöbb esetben jó egyezést mutattak a kísérletekkel, és segítségével eddig nem megmagyarázott, az anyageltávolításban fontos jelenségeket sikerült értelmezni.

A lézeres hátoldali folyadékos maratás feloldási határának tanulmányozásához a LIBWE és a két-nyaláb interferenciás elrendezés kombinációjával kvarc felszínébe készítettem rácsokat, melyeket AFM és profilométer segítségével karakterizáltam.

## Eredmények

1. A korábban használt eszközökön és anyagokon túl új, eddig a LIBWE kísérletekben nem alkalmazott ArF excimer lézert és abszorbensként alkalmazott szerves oldatot (naftalin/metil-metakrilát  $c=0,85$  és  $1,71 \text{ mol/dm}^3$ ) használtam ömlesztett kvarc céltárgy megmunkálására, amelyekkel az eddigieknél hatékonyabb anyageltávolítást valósítottam meg. A megmunkált felszín peremének atomi erő mikroszkópos tanulmányozása során megfigyeltem, hogy az érintetlen területre egy anyaghalom rakódott le (ami megolvadt majd visszafagyott ömlesztett kvarc), ami azt bizonyítja, hogy az anyageltávolításban kulcsszerepet játszanak a hőtani folyamatok. Megmutattam, hogy az egy impulzussal eltávolítható rétegvastagság függ az megmunkálást végző lézer hullámhosszától, az oldattól, valamint a lézer energiasűrűségétől. Az alkalmazott oldatok (naftalin/metil-metakrilát  $c=0,85$  és  $1,71 \text{ mol/dm}^3$ ; pirén/aceton,  $c=0,4 \text{ mol/dm}^3$ ), lézerek és kísérleti paraméterek esetén (energiasűrűségtartomány ArF lézer használatakor:  $200\text{-}1000 \text{ mJ/cm}^2$ ; KrF lézer esetén:  $300\text{-}1800 \text{ mJ/cm}^2$ ) az ömlesztett kvarc maratási sebessége  $4$  és  $55 \text{ nm/impulzus}$  között változott. Adott oldat és lézer esetén az energiasűrűség-maratási sebesség grafikon két eltérő meredekségű egyenessel illeszthető [T1, T3].  
Demonstráltam, hogy van egy olyan energiasűrűség tartomány, amely a vizsgált esetben (Lézer: KrF; oldatok: naftalin/metil-metakrilát  $c=0,85$  és  $1,71 \text{ mol/dm}^3$ ; pirén/aceton,  $c=0,4 \text{ mol/dm}^3$ )  $490$  és  $620 \text{ mJ/cm}^2$  között található, ahol a megmunkált felszín minősége a legjobb, azaz az  $Ra$  érdességi paraméter értéke itt éri el a minimális  $3\text{-}4 \text{ nm-es}$  értéket. Ennek a tartománynak az alkalmazási lehetőségek szempontjából kiemelt jelentősége van.
2. Az anyageltávolításban fontos mechanizmusok megértéséhez tanulmányoztam a felszín anyagösszetételét és optikai tulajdonságait. Az előbbi röntgen-fotoelektron spektroszkópiával végeztem, melynek eredményeként megmutattam, hogy a megmunkált ömlesztett kvarc felszíne szénrel szennyeződik (a szén az abszorbens oldat molekuláiból válik ki a besugárzás hatására). A szénrel szennyezett réteg vastagságát és optikai tulajdonságait spektroszkópiailag ellipszométerrel határoztam meg. Megállapítottam, hogy a módosult réteg vastagsága  $10\text{-}30 \text{ nm}$ ;  $248 \text{ nm-re}$  vonatkoztatott törésmutatója  $1,86$ , az abszorpciós tényezője pedig a KrF és ArF lézerek hullámhosszán jelentős,  $1,8\text{-}3 \cdot 10^5 \text{ 1/cm}$  közötti [T8].

3. Készítettem egy numerikus modellt a céltárgy hőmérsékletének meghatározására, mely a jelenlegi legrészletesebb modell, és a kísérleti tapasztalatokat legjobban megközelítő eredményeket szolgáltat. A számítás alapjául szolgáló modellben figyelembe vettem a folyamatban szereplő anyagok fázisátalakulását, bizonyos hőtani paramétereinek hőmérsékletfüggését, a módosult szénnel szennyezett felszíni réteget fényelnyelését és a céltárgy felforrt részének eltávolítását. Kiszámítottam a felforrt réteg vastagságát, amit az egy impulzussal eltávolított rétegvastagságnak megfelelően, a modell átlagosan 10% pontossággal megjósolja a maratási küszöbenergiasűrűséget, és jól becsüli a mért maratási sebességet az alacsony energiasűrűségű tartományban (ArF esetén: 260-440 mJ/cm<sup>2</sup>; KrF esetén: ≈400-700 mJ/cm<sup>2</sup>), valamint jól visszaadja ArF lézer alkalmazása esetén az energiasűrűség-maratási sebesség értékek két eltérő meredekségű egyenessel való illeszthetőségét. A felszín analitikai vizsgálata és a modellszámítás eredményei alapján megmutattam, hogy a módosult, szénnel szennyezett rétegnek fontos szerepe van az anyageltávolításban. A számításaim alapján megállapítottam, hogy az energiasűrűség-maratási sebesség grafikon töréspontja megfelel a módosult réteg teljes eltávolításának, a folyamat során megolvadt kvarcréteg pedig valószínűleg a módosult réteg újraképződésében játszik szerepet. A kísérlet és a számítások eredményeinek eltérése valószínűleg visszavezethető a következőkre: 1. folyamatban szereplő anyagok hőtani és optikai paraméterei nem ismertek pontosan a releváns hőmérséklettartományban; 2. az amorf szénréteg hatásait nem vettem figyelembe, mert nem állt rendelkezésre elegendő információ róla; 3. az amorf szénréteg és a módosult, szénnel szennyezett kvarcréteg kialakulásának időbeli folyamata nem ismert; 4. a szénréteg létrehozásához szükséges energiát nem vettem figyelembe; 5. a modell nem számol a mechanikai effektusokkal [T2, T8].
4. A lézeres hátoldali folyadékös maratás laterális feloldásának vizsgálatához a LIBWE technikát és a két-nyaláb interferenciás elrendezést kombináltam (a megoldást TWIN-LIBWE-nek neveztem el, melyben Nd:YAG lézer negyedik felharmonikusát használtam). Megvizsgáltam, hogy TWIN-LIBWE-vel készített rácsok minőségét leíró paraméterek hogyan függenek a lézer energiasűrűségétől és a lézerimpulzusok számától. Meghatároztam az optimális rácskészítési paramétereket az 550 ill. 990 nm-es periódusú rácsok esetén: mindkét esetben 15%-al a küszöb fölötti energiasűrűséggel (330 mJ/cm<sup>2</sup>), és 50-100 lézerimpulzussal lehetett a legjobb minőségű kvarcraácsot

készíteni. További vizsgálataimban a beesési szög növelésével 266 ill. 154 nm periódusú rácsokat készítettem az előző tapasztalatok felhasználásával. Megállapítottam, hogy a periódus csökkentése esetén az optimális rácskészítési paraméter tartományok erősen beszűkülnek: jóval kisebb impulzusszám és energiasűrűség tartomány eredményez megfigyelhető rácsot [T4, T5, T7].

5. Bebizonyítottam, hogy a LIBWE technikával akár 100 nm körüli laterális feloldás is elérhető: immerziós elrendezésben sikerült 104 nm periódusú kvarcrácsot készítenem, ami tudomásom szerint jelenleg a legkisebb periódusú, lézeres technikával készített kvarcrács. Megmutattam, hogy az általam használt anyagokkal és eszközökkel elérhető minimális felbontást az optikai korlátok mellett erősen limitálja a hődiffúzió is [T6, T7].

## Közlemények

### *Tézisek alapjául szolgáló közlemények*

- [T1] Cs. Vass, B. Hopp, T. Smausz, F. Ignác: „Experiments and numerical calculations for the interpretation of the backside wet etching of fused silica”, Thin Solid Films 453 – 454 (2004) 121–126
- [T2] Cs. Vass, T. Smausz and B. Hopp: „Wet etching of fused silica: a multiplex study”, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004) 2449–2454
- [T3] Cs. Vass, D. Sebők, B. Hopp: „Comparing study of subpicosecond and nanosecond wet etching of fused silica”, Applied Surface Science 252 (2006) 4768–4772
- [T4] Cs. Vass, K. Osvay, M. Csete, B. Hopp: „Fabrication of 550 nm gratings in fused silica by laser induced backside wet etching technique”, Applied Surface Science 253 (2007) 8059–8063
- [T5] Csaba Vass, Károly Osvay, Béla Hopp: „Fabrication of 150 nm period grating in fused silica by two-beam interferometric laser induced backside wet etching method”, Optics Express 14 (2006) 8354–8359
- [T6] C. Vass, K. Osvay, B. Hopp, Z. Bor: „104 nm period grating fabrication in fused silica by immersion two-beam interferometric laser induced backside wet etching technique”, Appl. Phys. A 87 (2007) 611–613
- [T7] Csaba Vass, Károly Osvay, Tamás Véső, Béla Hopp, Zsolt Bor: „Submicrometer grating fabrication in fused silica by interferometric laser-induced backside wet etching technique”, Appl Phys A 93 (2008) 69–73
- [T8] Csaba Vass, Judit Budai, Zoltán Schay, Béla Hopp: „Interpretation and Modeling of Laser-Induced Backside Wet Etching Procedure”, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering 5 (2010) 4347

### *Egyéb nemzetközi referált közlemények*

- [9] T. Smausz, B. Hopp, Cs. Vass, Z. Tóth: “Experimental study on droplet generation during pulsed laser deposition of polyethylene-glycol 1000”, Appl. Surf. Sci. 168 (2000) 146–149
- [10] B. Hopp, N. Kresz, Cs. Vass, Z. Tóth, T. Smausz, F. Ignác: “Spatial separation of fast and slow components of pulsed laser plumes”, Appl. Surf. Sci. 186 (2002) 298–302
- [11] B. Hopp, R. Hegedüs, Cs. Vass, T. Smausz, Z. Bor: “Three dimensional photography and modeling of jets and droplets ejected from the surface of excimer laser ablated molten polyethylene-glycol 1000”, Appl. Phys. A 79 (2004) 779–782
- [12] B Hopp, T Smausz, N Barna, Cs Vass, Zs Antal, L Kredics and D Chrisey: “Time-resolved study of absorbing film assisted laser induced forward transfer of Trichoderma longibrachiatum conidia”, J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) 833–837



- [13] M. Csete, Cs. Vass, J. Kokavecz, M. Goncalves, V. Megyesi, Zs. Bor, M. Pietralla, O. Marti: "Effect of sub-micrometer polymer gratings generated by two-beam interference on surface plasmon resonance", Appl. Surf. Sci. 247/1-4 (2005) 477-485
- [14] M. Csete, N. Kresz, Cs. Vass, G. Kurdi, Zs. Heiner, M. Deli, Zs. Bor, O. Marti: "Sub-micrometer adhesion modulation on polymer surfaces containing gratings produced by two-beam interference" Material Sci. and Engin. C. 25 (2005) 813-819
- [15] M. Csete, G. Szekeres, Cs. Vass, N. Maghelli, K. Osvay, Zs. Bor, M. Pietralla, O. Marti: "Surface plasmon resonance spectroscopy on rotated sub-micrometer polymer gratings generated by UV laser based two-beam interference", Appl. Surf. Sci. 252 (2006) 4773-4780
- [16] B. Hopp, Cs. Vass, T. Smausz, Zs. Bor: "Production of submicrometre fused silica gratings using laser-induced backside dry etching technique", J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 4843-4847
- [17] B. Hopp, Cs. Vass, T. Smausz: „Laser induced backside dry etching of transparent materials”, Appl. Surf. Sci. 253 (2007) 7922-7925
- [18] M. Csete, Á. Sipos, Cs. Vass, V. Megyesi, A. Kőházi-Kis, K. Osvay, Zs. Bor: "Atomic force microscopical and surface plasmon resonance spectroscopical investigation of sub-micrometer metal gratings generated by UV laser based two beam interference in Au-Ag bimetallic layers", Appl. Surf. Sci. 253 (2007) 7662-7671
- [19] T. Smausz, T. Csizmadia, N. Kresz, Cs. Vass, Zs. Marton, B. Hopp: „Influence on the laser induced backside dry etching of thickness and material of the absorber, laser spot size and multipulse irradiation” Appl. Surf. Sci. 254 (2007) 1091-1095
- [20] R. Böhme, C. Vass, B. Hopp, K. Zimmer: "Sub-wavelength ripples in fused silica after irradiation of the solid/liquid interface with ultrashort laser pulses", Nanotechnology 19, (2008) 495301 6pp
- [21] B. Hopp, T. Smausz, C. Vass, G. Szabó, R. Böhme, D. Hirsch, K. Zimmer: „Laser-induced backside dry and wet etching of transparent materials using solid and molten tin as absorbers”, Appl Phys A 94 899–904 (2009)
- [22] Smausz, T., Megyeri, G., Kékesi, R., Vass, C., György, E., Sima, F., Mihailescu, I.N., Hopp, B.: „Comparative study on Pulsed Laser Deposition and Matrix Assisted Pulsed Laser Evaporation of urease thin films”, Thin Solid Films (2009) 517 4299-4302
- [23] H. Tóháti, Á. Sipos, G. Szekeres, A. Mathesz, A. Szalai, P. Jójárt, J. Budai, Cs. Vass, A. Kőházi-Kis, M. Csete and Zs. Bor: „Surface plasmon scattering on polymer–bimetal layer covered fused silica gratings generated by laser induced backside wet etching”, Applied Surface Science Vol.255, Iss.10 5130-5137 (2009)
- [24] K. Zimmer, R. Böhme, C. Vass, B. Hopp: „Time-resolved measurements during backside dry etching of fused silica”, Applied Surface Science 255 (2009) 9617–9621

- [25] Béla Hopp, Tomi Smausz, Tamás Csizmadia, Csaba Vass, Tamás Csákó and Gábor Szabó: „Comparative Study of Different Indirect Laser-Based Methods Developed for Microprocessing of Transparent Materials”, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 5, No. 1 (2010) 80-85

### ***Konferenciák***

1. Cs. Vass, B. Hopp, T. Smausz: “Laser induced backside wet etching of fused silica: absorption coefficient dependence”, 3rd GR-I International Conference on New Laser Technologies and Applications, Szeptember 4-9. 2002., Patrasz, Görögország, előadás
2. Cs. Vass, B. Hopp, T. Smausz, F. Ignác: “Experiments and numerical calculations for the interpretation of the backside wet etching of fused silica”, E-MRS Spring Meeting 2003, Június 10-13., Strasbourg, Franciaország, poszter
3. Vass Csaba, Csákó Tamás, Smausz Tomi, Ignác Ferenc, Hopp Béla: „Átlátszó anyagok megmunkálása lézer indukált hátsó oldali nedves maratással”, Kvantumelektronika 2003, Budapest, 2003. október 21., poszter
4. Vass C, Sebők D, and Hopp B „Comparing study of sub-picosecond and nanosecond wet etching of fused silica”, E-MRS Spring Meeting 2005, máj. 31-jún.3, Strasbourg, Franciaország, poszter
5. Cs. Vass, K. Osvay, M. Csete, B. Hopp: „Fabrication of 550 nm gratings in fused silica by laser induced backside wet etching technique”, E-MRS Spring Meeting 2006, máj. 29-jún.2, Nice, Franciaország, poszter
6. Vass Csaba, Hopp Béla, Osvay Károly és Bor Zsolt: „Átlátszó anyagok lézeres szubmikrométeres megmunkálása”, Fizikus Vándorgyűlés, 2007. augusztus 22-24., Eger, előadás
7. Csaba Vass, Károly Osvay, Tamás Véső, Béla Hopp, Zsolt Bor: “Submicrometer grating fabrication in fused silica by interferometric laser induced backside wet etching technique”, COLA, 2007. szept. 24-28., Tenerife, Spanyolország, poszter
8. Vass Csaba, Hopp Béla, Osvay Károly, Bor Zsolt: „Átlátszó anyagok szubmikrométeres megmunkálása lézeres hátsó oldali folyadékos maratással”, Kvantumelektronika 2008, Budapest, 2008. október 17., poszter
9. C. Vass, J. Budai, Z. Schay, B. Hopp: „Interpretation and modeling of laser-induced backside wet etching procedure”, LAMP2009, 2009.jún.27-júl.2., Kobe, Japán, előadás